

Pęseta optyczna do pomiaru wybranych wielkości fizycznych
w skali mikro

(Autoreferat)

dr inż. Sławomir Drobczyński

Politechnika Wrocławska,
Wydział Podstawowych Problemów Techniki,
Katedra Optyki i Fotoniki

Wrocław, czerwiec 2018 r.

Sławomir Drobczyński

Spis treści

1. Dane osobowe	3
2. Przebieg dotychczasowej pracy badawczej.....	4
2.1. Działalność naukowa przed uzyskaniem stopnia doktora.....	4
2.2. Działalność naukowa po uzyskaniu stopnia naukowego doktora.....	5
3. Opis badań naukowych stanowiących podstawę wniosku habilitacyjnego.....	7
3.1. Wykaz publikacji.....	7
3.2. Omówienie osiągnięcia naukowego.....	9
3.2.1. Wstęp	9
3.2.2. Holograficzna generacja pułapek optycznych.....	10
3.2.3. Pomiar trajektorii pułakowanych obiektów	16
3.2.4. Pomiar wybranych wielkości fizycznych w skali mikro.....	19
3.2.5. Podsumowanie.....	21
4. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	22
4.1. Publikacje naukowe.....	22
4.2. Prezentacje na konferencjach naukowych.....	24
4.3. Współpraca naukowa	26
4.4. Staże naukowe.....	26
4.5. Patenty	26
4.6. Udział w projektach badawczych	27
4.7. Stypendia i nagrody.....	28
5. Działalność dydaktyczna.....	28
6. Popularyzacja nauki.....	30
7. Recenzowanie publikacji w czasopiśmie międzynarodowym i krajowym.....	30

1. Dane osobowe

Dane osobowe Imię i nazwisko: Sławomir Drobczyński Data urodzenia: 15 lutego 1978 r. Miejsce urodzenia: Lwówek Śląski Stan cywilny: żonaty, dwoje dzieci	Dane kontaktowe Politechnika Wrocławska Wydział Podstawowych Problemów Techniki Katedra Optyki i Fotoniki Wybrzeże Wyspiańskiego 27 50-370 Wrocław e-mail: slawomir.drobczynski@pwr.edu.pl tel.: 71 320 43 31 fax: 71 328 36 96
Wykształcenie <ul style="list-style-type: none">• Politechnika Wrocławska (10.2006), doktor nauk fizycznych Temat rozprawy doktorskiej „Polarymetria obrazowa z częstością nośną i możliwości jej zastosowania w biomedycynie”, promotor prof. Henryk Kasprzak.• Politechnika Wrocławska (2002–2006), studia doktoranckie: Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Instytut Fizyki• Politechnika Wrocławska (1997–2002), studia dzienne: Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Kierunek Fizyka Techniczna, Specjalność Inżynieria Biomedyczna. Praca magisterska na temat „Konstrukcja i wykonanie układu interferometrii płamkowej z wykorzystaniem lasera półprzewodnikowego z wiązką wyzwalaną impulsowo”.• Liceum Ogólnokształcące we Lwówku Śląskim, matura w 1997, klasa o profilu biologiczno-chemicznym.	
Przebieg kariery zawodowej <ul style="list-style-type: none">• 2016 krótkoterminowy staż naukowy: Department of Electrical & Computer Engineering, Colorado State University, USA;• od 2014 stanowisko adiunkta w Katedrze Optyki i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej;• 2008-2014, stanowisko adiunkta w Instytucie Fizyki Politechniki Wrocławskiej;• 2006-2008, stanowisko asystenta naukowo-dydaktycznego w Instytucie Fizyki Politechniki Wrocławskiej;• Luty 2007 – październik 2008, staż podoktorski na Uniwersytecie w Strasburgu, Francja;• 2006, 2-miesięczny staż na Uniwersytecie w Strasburgu, Francja;• 2005, 3-miesięczny staż na Uniwersytecie w Murcji, Hiszpania.	

2. Przebieg dotychczasowej pracy badawczej

2.1. Działalność naukowa przed uzyskaniem stopnia doktora.

Jestem absolwentem Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. W 2002 roku z wynikiem bardzo dobrym ukończyłem studia magisterskie na kierunku Fizyka Techniczna - specjalności Inżynieria Biomedyczna – Aparatura Elektromedyczna.

W ramach pracy magisterskiej pt. „*Konstrukcja i wykonanie układu interferometrii plamkowej z wykorzystaniem lasera półprzewodnikowego z wiązką wyzwalaną impulsowo*”, połączyłem wszystkie swoje zainteresowania i doświadczenia zdobyte podczas studiów w zakresie fizyki doświadczalnej, konstrukcji sterowników mikroprocesorowych oraz programowania w dziedzinie analizy obrazów. Podczas studiów brałem czynny udział w pracach Zespołu Optyki Fizjologicznej, którym kierował profesor Henryk Kasprzak. Po ukończeniu studiów magisterskich podjąłem studia doktoranckie w tym zespole.

Prace prowadzone w ramach mojego doktoratu miały być kontynuacją badań nad właściwościami dwójłomnymi tkanek oka (głównie rogówki) prowadzonych w Zespole Optyki Fizjologicznej. Ze względu na specyfikę obiektu badań, jakim jest oko, należało opracować bardzo szybką metodę pomiaru właściwości dwójłomnych ośrodków anizotropowych. Pierwszą część swojej pracy poświęciłem studiom z zakresu optyki ośrodków anizotropowych oraz metod pomiarowych. Wynikiem moich prac było znaczne rozwinięcie metody polarymetrii obrazowej z częstością nośną¹. Opracowana przez ze mnie metoda pozwala na pomiar właściwości ośrodków liniowo dwójłomnych niedichroicznych, liniowo dwójłomnych dichroicznych oraz eliptycznie dwójłomnych niedichroicznych. Zbudowałem również układ pomiarowy składający się z układu optycznego, układu elektronicznego oraz oprogramowania komputerowego. Działanie układu zostało potwierdzone w pomiarach statycznego, jednorodnego obiektu dwójłomnego, jak również niejednorodnych próbek elastoptycznych i tkanek oka. W 2005 roku odbyłem 3-miesięczny staż na Uniwersytecie w Murcji w Hiszpanii², w cenionym na świecie zespole badawczym w dziedzinie optyki fizjologicznej kierowanym przez profesora Pablo Artala.

W 2006 roku przed obroną doktoratu wyjechałem na 2-miesięczny staż w zespole profesora Jean-Pierre Muncha na Uniwersytecie w Strasburgu. Podczas pobytu we Francji po raz pierwszy zetknąłem się techniką pułapkowania optycznego. Po skończeniu stażu otrzymałem propozycję pozycji *postdoca* w Instytucie Fizyki i Chemii Materiałów na Uniwersytecie w Strasbourgu.

¹ Drobczynski S., Kasprzak H., Appl. Opt. 44, 3160-3166, 2005.

² Drobczynski S., Bueno J., Artal P., Kasprzak H., Appl. Opt., 45, 5489-5496, 2006.

2.2. Działalność naukowa po uzyskaniu stopnia naukowego doktora.

W 2006 roku uzyskałem tytułu doktora nauk fizycznych i zostałem zatrudniony na stanowisku asystenta naukowo-dydaktycznego w Instytucie Fizyki Politechniki Wrocławskiej. W związku z moimi zainteresowaniami dotyczącymi badań właściwości ośrodków optycznie anizotropowych, rozpocząłem współpracę z dr. hab. Piotrem Kurzynowskim. Wspólnie pracowaliśmy nad rozwojem technik pomiarowych ośrodków dwójfomnych³⁴⁵⁶⁷. Brałem również udział w pracach zespołu prof. Ryszarda Poprawskiego nad konstrukcją układu do dynamicznego pomiaru dwójfomności spontanicznej ferroików z wykorzystaniem mikroskopu polaryzacyjnego.

W lutym 2007 roku wyjechałem na 2-letni staż naukowy w Instytucie Fizyki i Chemii Materiałów na Uniwersytecie w Strasburgu. W trakcie stażu uczyłem się techniki pułapkowania optycznego i jej wykorzystania w pomiarach z zakresu biologii molekularnej. W ramach badań interakcji specyficznych białek z nićmi DNA, opracowałem metodę stabilizacji układu pomiarowego w oparciu o analizę obrazów w czasie rzeczywistym⁸. Jeszcze podczas pobytu we Francji zainteresowały mnie holograficzne metody generacji i sterowania pułapkami optycznymi.

Po powrocie do Polski, podjąłem działania mające na celu budowę układu manipulatora optycznego w Instytucie Fizyki Politechniki Wrocławskiej. Ze względu na moje zainteresowania optyką dyfrakcyjną rozpocząłem prace w zespole naukowym dr hab. Jana Masajady. Na początku zająłem się numerycznym modelowaniem komputerowo-generowanych struktur dyfrakcyjnych.

Pierwszy projekt pt. „Zastosowanie niskomocowych laserów półprzewodnikowych do generacji holograficznych pułapek optycznych” finansowany przez MNiSW otrzymałem w 2010 roku. Wynikiem realizacji projektu było powstanie działającego układu holograficznego manipulatora optycznego, który umożliwił poszukiwania współpracy naukowej w dziedzinie biologii i medycyny. Równocześnie rozwijałem metody generacji syntetycznych hologramów oraz wykorzystania kamer wideo i analizy obrazów do śledzenia trajektorii i dynamiki pułapkowanych obiektów.

W ramach kolejnego projektu pt. „Pęseta optyczna w zastosowaniach biomedycznych” przyznanego przez NCBiR, w którym byłem wykonawcą, zbudowałem drugi, udoskonalony układ holograficznego manipulatora optycznego pracującego z laserem dużej mocy. Projekt umożliwił rozwój bazy sprzętowej oraz nawiązanie współpracy w zakresie badań biologicznych. W 2011 mój dyplomant mgr inż. Marcin Bacia rozpoczął interdyscyplinarne studia doktoranckie. Jego rozprawa doktorska, której byłem promotorem pomocniczym,

³ Kurzynowski P., Wozniak W. A., **Drobczynski S.**, Opt. Comm. 267, 44-49, 2006.

⁴ **Drobczynski S.**, Kurzynowski P., Opt. Eng. 47, 023603-1 - 023603-4, 2008.

⁵ Kurzynowski P., **Drobczynski S.**, Wozniak W.A., Opt. Express 17, 10144-10154, 2009.

⁶ Wozniak W.A., Kurzynowski P., **Drobczynski S.**, Appl. Opt. 50, 203-212, 2011.

⁷ Pretka M., Wozniak W.A., Kurzynowski P., **Drobczynski S.**, Appl. Opt. 55, 868-872, 2016.

⁸ **Drobczynski S.**, Hebraud P., Munch J.P., Harlepp S., Opt. Eng. 48, 113601-1 - 113601-5, 2009.

dotyczyła zastosowania holograficznej pęsety optycznej do pomiarów wybranych właściwości preparatów biologicznych i koloidów.

Moja współpraca w zakresie badań komórkowych wymagała użycia pułapek optycznych charakteryzujących się dużo większą siłą chwytu w stosunku do tych, które uzyskiwane były metodą holograficzną. Z tego powodu wyposażyłem manipulator w układ sterowania wiązką laserową dużej mocy. Do tego celu wykorzystałem parę elektrycznie sterowanych zwierciadeł skanujących. Naturalną konsekwencją użycia laserów dużej mocy był lokalny pomiar temperatury w mikro skali. We współpracy z prof. A. Bednarkiewiczem z Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu, opracowałem metodę pomiaru temperatury z wykorzystaniem nanoluminoforów domieszkowanych jonami lantanowców. Praca z optycznymi termometrami, a później z „mikro-grzałkami” zbudowanymi z porowatego krzemu, wymusiła kolejne modyfikacje układu manipulatora optycznego. Mikro-grzałki i termometry aktywowane są światłem o różnych długościach fali, stąd konieczność jednoczesnego i współbieżnego sterowania wiązkami laserowymi o różnych długościach fali. W pomiarach temperatury z wykorzystaniem nanoluminoforów monitoruje się widmo luminescencji, co wymaga toru do pomiarów spektralnych.

Opracowany przeze mnie unikalny w skali kraju wielofunkcyjny manipulator optyczny umożliwił prowadzenie zaawansowanych badań naukowych biologicznych i medycznych w skali mikro. Jestem inicjatorem konsorcjum naukowego w skład, którego wchodzi Politechnika Wrocławska, Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN oraz Uniwersytet Medyczny we Wrocławiu, powołanego w celu wystąpienia o grant NCN na prowadzenie wspólnych badań z wykorzystaniem zbudowanego przeze mnie manipulatora. Wystąpienie o grant pt. „Opracowanie multifunkcyjnych szczypiec optycznych i mikrorobotów do badania wpływu zlokalizowanej hipertermii na komórki i sferoidy nowotworowe uzyskane z hodowli pierwotnych” okazało się skuteczne, a umowa z NCN o realizację wspólnego grantu, którego jestem kierownikiem, jest w trakcie podpisywania.

Współpracę międzynarodową prowadzę między innymi z University of Eastern Finland oraz Colorado State University w USA.

Zbudowany przeze mnie manipulator optyczny umożliwił wykonanie wielu badań naukowych z obszaru biologii i medycyny, a także prac doktorskich i dyplomowych. Moja działalność naukowa dotycząca rozwoju techniki pułapkowania optycznego oraz jej zastosowań metrologicznych jest podstawą niniejszego wniosku habilitacyjnego.

3. Opis badań naukowych stanowiących podstawę wniosku habilitacyjnego

Jako osiągnięcie naukowe zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 ze zm.), wskazuję jednotematyczny cykl publikacji pt. "Pęseta optyczna do pomiaru wybranych wielkości fizycznych w skali mikro".

3.1. Wykaz publikacji

Zestawienie cyklu jednotematycznych publikacji z zakresu optyki i fizyki doświadczalnej dotyczących opracowania układu pęsety optycznej i jej wykorzystania do pomiarów wielkości fizycznych w skali mikro. Cykl 10 publikacji stanowiących rozprawę habilitacyjną wraz z informacją o współczynniku IF oraz punktacją ministerialną z roku 2017.

l.p.		IF*	M**
H1	Drobczyński S. , Hebraud P., Munch J.P., Harlepp S., Design and realization of a high stability optical tweezer, Opt. Eng. 48, 113601-1 - 113601-5, 2009.	1,082	20
	<i>Byłem pomysłodawcą i wykonawcą metody stabilizacji układu pęsety optycznej opartej na analizie obrazu, brałem udział w pomiarach i analizie danych oraz przygotowaniu manuskryptu.</i> <i>Swój udział procentowy szacuję na 50%</i>		
H2	Drobczyński S. , Duś-Szachniewicz K., Symonowicz K., Głogocka D., Spectral analysis by a video camera in a holographic optical tweezers setup, Opt. Applicata 43, 739-746, 2013.	0,637	15
	<i>Byłem pomysłodawcą tematyki zaproponowanej w tej publikacji. Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu całego stanowiska pomiarowego i wszystkich pomiarów w układzie manipulatora optycznego. Brałem udział w analizie otrzymanych wyników. Przygotowałem manuskrypt publikacji.</i> <i>Swój udział procentowy szacuję na 60%</i>		
H3	Masajada J., Bacía M., and Drobczyński S. , Cluster formation in ferrofluids induced by holographic optical tweezers, Opt. Lett. 38, 3910-3913, 2013.	3,416	45
	<i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu układu manipulatora optycznego, oprogramowania do holograficznego sterowania pułapkami optycznymi oraz obsługi szybkiej kamery do obserwacji zjawisk w cieczy paramagnetycznej.</i> <i>Swój udział procentowy szacuję na 30%</i>		
H4	Drobczyński S. , Masajada J., Woźniak M. and Ziółkowski P., Laser diodes in holographic optical tweezers, Photonics Lett. of Poland 6, 35-37, 2014.		10
	<i>Byłem pomysłodawcą tematyki zaproponowanej w tej publikacji. Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu całego stanowiska pomiarowego, przeprowadzeniu, wszystkich pomiarów i analizie danych w układzie manipulatora optycznego. Przygotowałem manuskrypt publikacji.</i> <i>Swój udział procentowy szacuję na 60%</i>		

H5	Ślęzak J., Drobaczyński S. , Weron K. and Masajada J., Moving average process underlying the holographic-optical–tweezers experiments, Appl. Opt. 53, B254-B258, 2014.	1,650	30
	<p><i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu całego układu pomiarowego i wszystkich pomiarów w układzie manipulatora optycznego. Brałem udział w analizie otrzymanych wyników i przygotowaniu manuskryptu.</i></p> <p><i>Swój udział procentowy szacuję na 40%</i></p>		
H6	Drobczynski S. , Ślęzak J., Time-series methods in analysis of the optical tweezers recordings, Appl. Opt. 54, 7106-7114, 2015.	1,650	30
	<p><i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu całego układu pomiarowego, zaplanowaniu i wykonaniu wszystkich pomiarów w układzie manipulatora optycznego. Brałem udział w analizie otrzymanych wyników i przygotowaniu manuskryptu.</i></p> <p><i>Swój udział procentowy szacuję na 60%</i></p>		
H7	Drobaczyński S. , Duś-Szachniewicz K., Real time force measurement in double wavelength optical tweezers, JOSA B 34, 38-43, 2017.	1,843	35
	<p><i>Byłem pomysłodawcą tematyki zaproponowanej w tej publikacji. Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu całego stanowiska pomiarowego, wszystkich pomiarów i analizie danych w układzie manipulatora optycznego. Przygotowałem manuskrypt publikacji.</i></p> <p><i>Swój udział procentowy szacuję na 80%</i></p>		
H8	Drobaczyński S. , Prorok K., Tamarov K., Duś-Szachniewicz K., Lehto V-P., Bednarkiewicz A., Towards controlled photothermal treatment of single cell: Optically induced heating and remote temperature monitoring in-vitro through double wavelength optical tweezers, ACS Photonics 4, 1993-2002, 2017.	6,756	40
	<p><i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji badań, wykonaniu całego stanowiska pomiarowego, wykonaniu eksperymentów w układzie manipulatora optycznego, analizie danych pomiarowych oraz udziale w przygotowaniu manuskryptu.</i></p> <p><i>Swój udział procentowy szacuję na 45%</i></p>		
H9	Lamperska W., Masajada J., Drobaczyński S. , Gusin P., Two-laser optical tweezers with a blinking beam, Opt. and Lasers in Eng. 94, 82–89, 2017.	2,431	30
	<p><i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu układu manipulatora optycznego, oprogramowania do holograficznego sterowania pułapkami optycznymi i obsługi szybkiej kamery wraz z analizą obrazów umożliwiającą pomiar trajektorii pułapkowanych obiektów. Zaproponowałem i wykonałem także elektroniczne modulowanie wiązki laserowej.</i></p> <p><i>Swój udział procentowy szacuję na 20%</i></p>		

H10	Fraczkowska K., Bacia M., Przybyło M., Drabik D., Kaczorowska A., Rybka J., Stefanko E., Drobczynski S. , Masajada J., Podbielska H., Wrobel T., Kopaczynska M., Alterations of biomechanics in cancer and normal cells induced by doxorubicin, Biomedicine & Pharmacotherapy 97, 1195–1203, 2018.	2,759	25
	<p><i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu układu manipulatora optycznego, oprogramowania do holograficznego sterowania pułapkami optycznymi i analizy obrazów umożliwiającej pomiary sił. Brałem udział w pomiarach właściwości biomechanicznych z wykorzystaniem manipulatora optycznego i analizie wyników.</i></p> <p><i>Swój udział procentowy szacuję na 10%</i></p>		

IF* - Impact factor, M** - lista MNiSW

3.2. Omówienie osiągnięcia naukowego

Dorobek naukowy, który stanowi osiągnięcie habilitacyjne, dotyczy tematyki pułapkowania optycznego. Moje publikacje z zakresu tej tematyki dotyczą trzech wątków: holograficznej generacji pułapek optycznych, metody pomiaru trajektorii pułapkowanych obiektów oraz zastosowania pęsety optycznej do pomiarów parametrów fizycznych w mikro skali.

3.2.1. Wstęp

W 1873 roku James Clerk Maxwell w swojej pracy “Treatise on Electric and Magnetism” wprowadził teorię ciśnienia światła⁹, z której wynika, że światło może wywierać siłę optyczną. Fakt ten został potwierdzony eksperymentalnie w 1900 roku przez rosyjskiego fizyka Piotra Lebediewa. Znaczący przełom nad badaniami sił optycznych nastąpił dopiero po pojawieniu się laserów. Wiązki laserowe o mocach setek miliwatów zdolne są do wywierania sił rzędów pikoniutonów (pN). Pionierem eksperymentów z silnie zogniskowaną wiązką laserową działającą na drobiny dielektryczne był Arthur Ashkin. W 1986 roku opublikował pracę¹⁰, w której opisał pierwszą udaną próbę pułapkowania optycznego z wykorzystaniem pojedynczej wiązki laserowej.

Dla cząstek, których rozmiary są dużo mniejsze niż długość fali, efekt pułapkowania tłumaczymy w oparciu o teorię rozpraszania światła według Rayleigha. Na dielektryczną kulkę umieszczoną w zogniskowanej gaussowskiej wiązce światła działają dwie siły. Pierwsza jest konsekwencją przekazywania pędu przez rozproszone fotony. Jest ona proporcjonalna do natężenia światła i działa wzdłuż kierunku propagacji wiązki świetlnej. Druga siła powstaje wskutek wzajemnego oddziaływania składowej elektrycznej wiązki światła oraz indukowanego dipola elektrycznego, który powstaje w obiekcie na skutek oddziaływania z wiązką światła. Siła jest proporcjonalna do kwadratu natężenia pola elektrycznego i działa w kierunku gradientu natężenia światła. Warunkiem stabilnego pułapkowania jest dominacja siły pochodzącej od gradientu pola elektrycznego nad siłą rozpraszania wynikającą z przekazywania pędu przez fotony.

⁹ Andrzej Kajetan Wróblewski, *Historia fizyki*, PWN Warszawa 2007

¹⁰ Ashkin A., Dziedzic J. M., Bjorkholm J. E., Chu S., *Opt. Lett.* 11,288-290, 1986.

Dla cząstek o rozmiarach większych niż długość fali świetlnej, efekt pułapkowania optycznego można wyjaśnić na gruncie optyki geometrycznej. Promienie świetlne padające na transparentną cząstkę o wypadkowym współczynniku załamania światła większym od współczynnika ośrodka, w którym się ona znajduje, ulegają dwukrotnemu załamaniu. Zmianie kierunku biegu promieni towarzyszy zmiana pędu niesionego przez falę świetlną. Zgodnie z zasadą zachowania pędu, część pędu zostaje przekazana cząstce, w wyniku czego pojawia się wypadkowa siła reakcji działająca na cząstkę. Suma wszystkich promieni przechodzących przez nią wytwarza niezrównoważoną siłę powodującą przesuwanie cząstki ku najjaśniejszemu obszarowi wiązki światła. Siłę tę nazywamy siłą gradientową. Stabilne pułapkowanie osiągamy, kiedy siła gradientowa w obszarach poza ogniskiem jest dostatecznie duża do przewyższenia siły rozpraszania, która z kolei pcha obiekt na zewnątrz pułapki w kierunku osi optycznej. Takie warunki występują w praktyce tylko w wiązkach światła o dużym gradiencie natężenia, które uzyskuje się przy pomocy obiektywów mikroskopowych o dużej aperturze numerycznej.

Pułapki optyczne wykonane tą techniką nie mogą chwytać atomów w temperaturze pokojowej, ale mogą być użyte do pułapkowania i przemieszczania cząsteczek większych rozmiarów w zakresie kilku nanometrów do kilkudziesięciu mikrometrów. To sprawia, że ta technika pułapkowania optycznego znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach nauki. W ciągu kilku lat od opublikowania pracy przez Ashkina, w wielu laboratoriach na świecie zapoczątkowano wiele interesujących badań. Pęseta optyczna może być wykorzystana do manipulowania nieożywioną i żywą materią. Odpowiedni dobór długości fali pozwala minimalizować niszczące skutki dużych energii wiązki laserowej w próbkach biologicznych. Olbrzymią zaletą techniki pułapkowania optycznego jest sterylny chwyt struktur biologicznych. Uzyskiwane siły rzędu pN są wystarczające do przemieszczania komórek ich organelli, rozciągania i modyfikowania pojedynczych makromolekuł, na przykład DNA.

Profesor Maksymilian Pluta napisał w swojej książce¹¹: „*Mikromanipulator laserowy jest urządzeniem służącym do wykonywania różnych zabiegów na mikroobiektych poprzez „punktowe” ich naświetlanie promieniowaniem laserowym i równocześnie umożliwiającym obserwację, czy też fotograficzną rejestrację, skutków tych zabiegów*”. Dziś już wiemy, że mikromanipulator optyczny zyskał na swojej funkcjonalności i zgodnie ze swoją nazwą jest w stanie przemieszczać mikroobiekty.

W niniejszym autoreferacie wskazuję na swój wkład w rozwój techniki mikromanipulacji optycznej oraz jej wykorzystania do pomiarów wybranych wielkości fizycznych w mikroskali. Na podstawie literatury naukowej można stwierdzić, że mianem manipulatora optycznego (*ang. optical tweezers*) określamy układ generujący pułapkę optyczną, z tym zastrzeżeniem, że położenie pułapki w obszarze preparatu jest zmienne i powinno być związane ze zmianą jej położenia względem preparatu, a nie ze zmianą położenia preparatu względem pułapki. W dalszej części będę używał wymiennie terminu pęseta optyczna i manipulator optyczny.

3.2.2. Holograficzna generacja pułapek optycznych

Aby wytworzyć pułapkę optyczną, czyli wiązkę światła charakteryzująca się dużym gradientem natężenia, zasadniczo muszą być spełnione dwa warunki. Po pierwsze w układzie

¹¹ Maksymilian Pluta, *Mikroskopia Optyczna*, PWN Warszawa 1982

mikroskopowym, przy pomocy obiektywu mikroskopowego o dużej aperturze numerycznej ($NA \geq 1$), należy silnie zogniskować wiązkę laserową w modzie TEM₀₀. Po drugie efektywna średnica wiązki laserowej powinna być poszerzona tak, aby w możliwie największym stopniu wypełniła aperturę wejściową obiektywu. W praktyce do tego celu wykorzystujemy odpowiednio zaprojektowany układ lunety Keplera.

Istotną funkcją pęsety optycznej jest tworzenie układu kilku niezależnych pułapek i sterowanie ich położeniem w obrębie preparatu mikroskopowego. W ten sposób uzyskujemy możliwość wielopunktowego chwytu bądź oddziaływania na mikroskopijne obiekty.

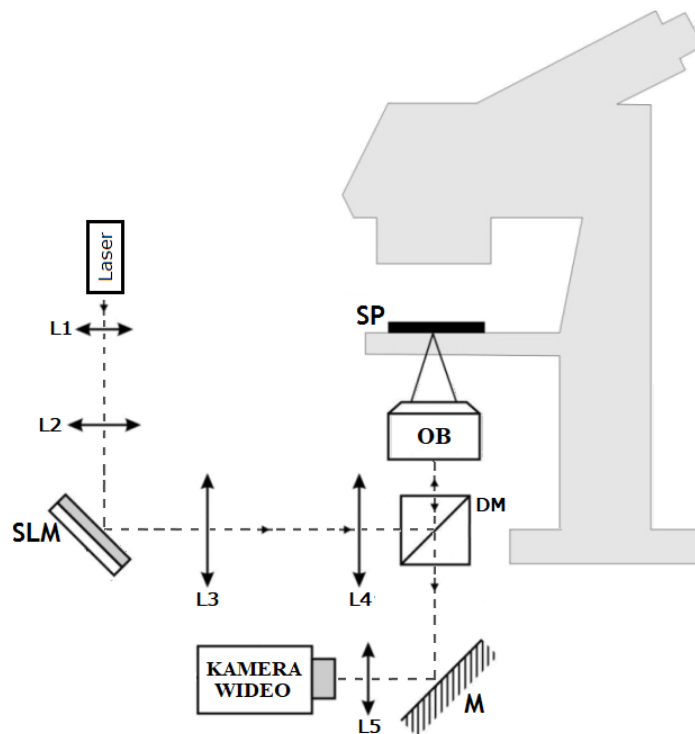
Historycznie pierwsze układy pęsety optycznej wyposażone były w jedną nieruchomą pułapkę oraz stolika mikroskopowego zapewniającego ruch preparatu względem pułapki optycznej. W celu zapewnienia wysokiej rozdzielczości ruchu preparatu względem pułapki wykorzystano piezo przesuwniki działające z dokładności pojedynczych nanometrów.

Kolejnym krokiem w ewolucji układu manipulatora optycznego było wygenerowanie kilku pułapek z niezależną kontrolą ich położenia w obrębie preparatu mikroskopowego. W tym celu wykorzystano system skanowania wiązki laserowej podobny do tego, który stosuje się w skaningowej mikroskopii konfokalnej. Położenie wiązki laserowej jest cyklicznie zmieniane między kilkoma punktami, które odpowiadają miejscom powstawania pułapek optycznych. Jeśli czas zmiany położenia będzie krótszy od czasu, w którym wiązka laserowa pozostanie nieruchoma w danym punkcie, to efektywnie obserwować będziemy układ kilku pułapek optycznych. W literaturze anglojęzycznej metoda ta jest określana mianem *time-sharing*.

W praktyce, najczęściej układ skanowania realizowany jest za pomocą zwierciadeł galwanometrycznych lub modulatorów akustooptycznych. Liczba stabilnych pułapek otrzymanych tą metodą związana jest z maksymalną częstotliwością skanowania wiązki i bezwładnością pułapowanego obiektu. Zwykle liczba pułapek nie przekracza dziesięciu.

Mniej więcej od 2000 roku pojawiają się prace na temat wykorzystania dyfrakcyjnych elementów optycznych DOE do generowania pułapek optycznych. Rozwój technologii ciekłokrystalicznych przestrzennych modulatorów światła w konfiguracji odbiciowej LCoS (*ang. Liquid Crystal on Silicon*), dał początek holograficznej generacji pułapek optycznych. Atrakcyjność tej metody polega na możliwości tworzenia kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu stabilnych pułapek, pozycjonowania każdej z nich nie tylko w płaszczyźnie preparatu, ale także wzdłuż osi propagacji światła. Umożliwia ona również kształtowanie rozkładu natężenia wiązki, dzięki czemu możliwe jest generowanie pułapek nie tylko o gaussowskim rozkładzie natężenia światła, ale również Laguerrea-Gausa lub Bessela.

Rysunek 1 przedstawia schemat układu holograficznego manipulatora optycznego. Układ lunety zbudowany z obiektywów L1 i L2 służy do oświetlenia przestrzennego modulatora światła SLM falą płaską. U podstaw holograficznej generacji pułapek optycznych leży dyfrakcyjna teoria odwzorowania.



Rysunek 1. Schemat układu holograficznego manipulatora optycznego.

W płaszczyźnie ogniskowej obrazowej SP obiektywu mikroskopowego o dużej aperturze numerycznej OB, rozkład amplitudy fali świetlnej opisany jest transformatą Fouriera struktury dyfrakcyjnej wyświetlonej na modulatorze SLM. Modulator SLM jest macierzą sterowanych komórek ciekłokrystalicznych, w której w każdej z nich możemy uzyskać zmianę współczynnika załamania światła. Komputerowo generowany hologram CGH jest bitmapą, w której poziom jasności poszczególnych pikseli odpowiada wprowadzanemu przesunięciu fazowemu przez komórki ciekłokrystaliczne. Pułapki optyczne uzyskiwane są przez silne zogniskowanie wiązek ugiętych na strukturze komputerowo generowanych fazowych hologramów wyświetlanych na modulatorze SLM. Luneta zbudowana z obiektywów L3 i L4 pracująca w układzie „4f” poszerza zmodulowaną falę płaską tak, aby centralna jej część wypełniła aperturę obiektywu OB. Zwierciadło dichroiczne DM dobiera się tak, aby posiadało duży współczynnik odbicia dla wiązki lasera najczęściej z zakresu IR oraz duży współczynnik transmisji dla światła z zakresu widzialnego dla toru obserwacji próbki mikroskopowej.

Badania opisane w pracach **H2-H10** przeprowadzane były w układzie, którego podstawowa konfiguracja przedstawiona jest na rysunku 1. Realizacja wyspecjalizowanych zadań manipulatora optycznego wymagała modyfikacji tego układu pomiarowego. Równie ważne było opracowanie algorytmów generowania struktur fazowych do kierowania i kształtowania wiązki laserowej. Wyzwaniem stało się także opracowanie szybkich metod obliczania struktur fazowych, w szczególności o zwiększonej wydajności dyfrakcyjnej. Zaproponowane rozwiązania pozwoliły na opracowanie specjalistycznego oprogramowania, które stało się integralną częścią zbudowanego przeze mnie manipulatora optycznego. Umożliwia ono obliczanie CGH, sterowanie SLM oraz obsługę kamery wideo. Struktura dyfrakcyjna wyświetlana na modulatorze SLM jest obliczana w taki sposób, aby pułapka optyczna pojawiła się w miejscu wskazanym kursorem na obrazie wideo preparatu

mikroskopowego. Wykorzystując monitor z panelem dotykowym opracowałem interaktywny sposób kierowania pułapkami optycznymi, dający wrażenie dotykania struktur mikroskopowych podczas ich przesuwania.

Proces przygotowania syntetycznej struktury dyfrakcyjnej wyświetlanej na modulatorze SLM przebiegał według następującego schematu. Hologram fazowy $\phi_k(r)$ generujący k -tą pułapkę optyczną otrzymuje się na dwa sposoby: z wykorzystaniem dwuwymiarowej siatki dyfrakcyjnej o dyskretnych poziomach fazy (*ang. blazed grating*) uginającej wiązkę laserową w zadany punkt preparatu lub obliczając transformatę Fouriera zadanego rozkładu natężenia światła reprezentującego pułapkę optyczną w płaszczyźnie ogniskowej obrazowej obiektywu mikroskopowego. Wypadkowy rozkład fazy $\phi_T(r)$ generujący zadany układ pułapek optycznych wyznaczany jest według następującego wzoru:

$$\phi_T(r) = \arg\{\sum_k T_k(r)\} = \arg\{\sum_k A_k e^{i\phi_k(r)}\}. \quad (1)$$

Wartości współczynników A_k zostały unormowane tak, że $0 \leq A_k \leq 1$. Zmieniając wartość k -tego współczynnika uzyskujemy regulację rozkładu energii w poszczególnych pułapkach. Dodanie modulo 2π do wypadkowego rozkładu fazy struktury $\phi_L(r)$ fazowej soczewki Fresnela powoduje przemieszczanie układu pułapek wzdłuż osi propagacji światła.

$$\phi_{SLM}(r) = \{\phi_T(r) + \phi_L(r)\} \bmod 2\pi. \quad (2)$$

Aby zmieniać głębokość w preparacie każdej pułapki z osobna należy w funkcji $T_k(r)$ generującej pułapkę uwzględnić strukturę $\phi_{Lk}(r)$ fazowej soczewki Fresnela:

$$T_k(r) = A_k e^{i(\phi_k(r) + \phi_{Lk}(r))}. \quad (3)$$

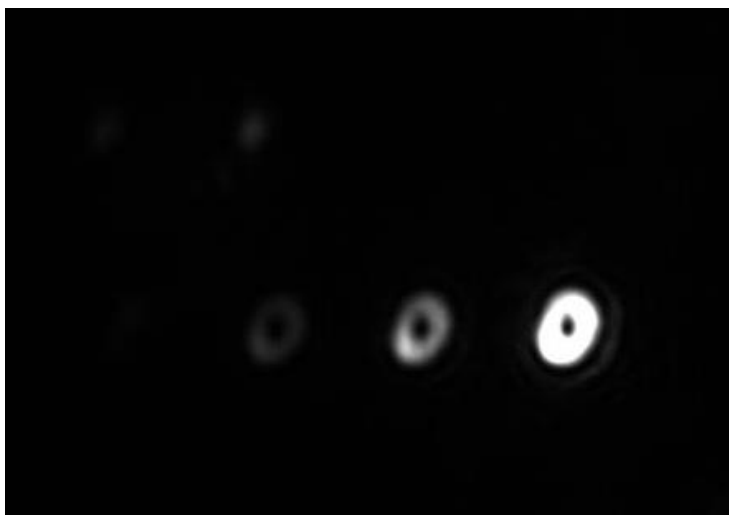
Do argumentu funkcji $T_k(r)$ można również dodać spiralny rozkład fazy $\phi_V(r)$, w wyniku czego powstanie pułapka o rozkładzie natężenia typu Laguerrea-Gausa.

Ostatni etap to uzyskanie bitmapy $B(r)$ reprezentującej funkcję rozkładu fazy $\phi_{SLM}(r)$:

$$B(r) = G\{\phi_{SLM}(r)\}. \quad (4)$$

Ze względu na dyspersję modulatora ciekłokrystalicznego należy pamiętać o ograniczeniu liczby poziomów szarości. Na przykład, dla modulatora X10468-07 firmy Hamamatsu, dla fali od długości 1064nm modulację 2π uzyskuje się dla poziomu szarości o wartości 216, a dla fali o długości 980 nm już dla 196.

Brak ciągłości profilu fazy jest przyczyną niepożądanego efektu powielenia pułapki (*ang. ghost traps*). Pojawienie się wyższych rzędów dyfrakcyjnych psuje bilans energetyczny w układzie.



Rysunek 2. Powielenie pułapki podczas rekonstrukcji hologramu (*ang. ghost traps*).

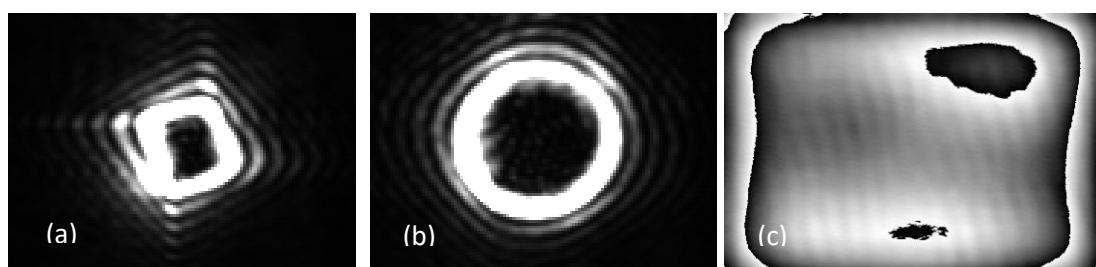
Implementacje podstawowych obliczeń wektorowych wykonałem przy użyciu zoptymalizowanych bibliotek matematycznych IPP firmy Intel (Intel® Integrated Performance Primitives for Intel® Architecture). Opracowane oprogramowanie automatycznie wykrywa typ procesora i dobiera optymalne wykorzystanie technologii MMX (Matrix Math eXtensions). Zastosowanie tej technologii pozwala na szybkie obliczanie fazowych struktur dyfrakcyjnych. W połączeniu z wyświetlaniem obrazu wideo preparatu mikroskopowego z prędkością 60 klatek na sekundę, daje płynność ruchu podczas przesuwania pułapkowanych obiektów. Opisane algorytmy do generacji holograficznych pułapek optycznych wraz z odpowiednimi modyfikacjami było wykorzystywane do przeprowadzenia badań zaprezentowanych w pracach H2-H10.

W pracy H3 wykorzystano dwie właściwości holograficznej generacji pułapek optycznych. Pierwsza z nich to możliwość jednoczesnej generacji kilku stabilnych pułapek, co jest nieosiągalne w metodzie ze skanowaniem wiązki laserowej. Druga, to tworzenie pułapek o różnych rozkładach natężenia światła. Do tej pory obserwacja zachowania cieczy paramagnetycznej, popularnie nazywanej ferrofluidem, była prowadzona tylko w obecności pojedynczej wiązki gaussowskiej. Nad wyjaśnieniem mechanizmów fizycznych rządzących zachowaniem się ferrofluidu oświetlanego zogniskowaną wiązką laserową wciąż toczą się dyskusje naukowe. W literaturze opisywane są głównie trzy efekty: pułapkowanie optyczne, efekty termiczne oraz oddziaływania międzycząsteczkowe. Badania opisane w pracy H3, uzyskane w układzie holograficznego manipulatora optycznego, wzbogacają zbiór obserwowanych zjawisk. Chodzi tu głównie o dynamikę i interakcję między klastrami ferrofluidu w obecności trzech pułapek optycznych. Podczas pomiarów z wykorzystaniem wiązek z wirem optycznym okazało się, że niebagatelną sprawą jest korekcja płaskości modulatora ciekłokrystalicznego. W wyniku procesu technologicznego powierzchnia aktywna modulatora nie jest płaska. Odbicie fali płaskiej od modulatora, nawet dla wyświetlanej jednorodnej struktury, powoduje deformację frontu falowego. Efekt ten ujawnił się szczególnie podczas generowania pułapek z wirem optycznym i był on coraz bardziej widoczny wraz z zwiększaniem ładunku topologicznego wiru.

W procedurze obliczania struktury fazowej (rów. 2) należy uwzględnić fazową mapę $\phi_C(r)$ korekcji płaskości modulatora SLM. Równanie 2 przyjmuje wtedy postać:

$$\phi_{SLM}(r) = \{\phi_T(r) + \phi_L(r) + \phi_C(r)\} \bmod 2\pi. \quad (5)$$

Na rysunku 3 przedstawiono wpływ zastosowania korygującej mapy fazowej $\phi_C(r)$ przy generacji wiązki z wirem optycznym o ładunku topologicznym 6. Rozkład fazy $\phi_C(r)$ (Rysunek 3c) otrzymany jest na podstawie wyników pomiaru deformacji frontu falowego odbitego od powierzchni SLM w układzie interferometru Macha-Zehndera.

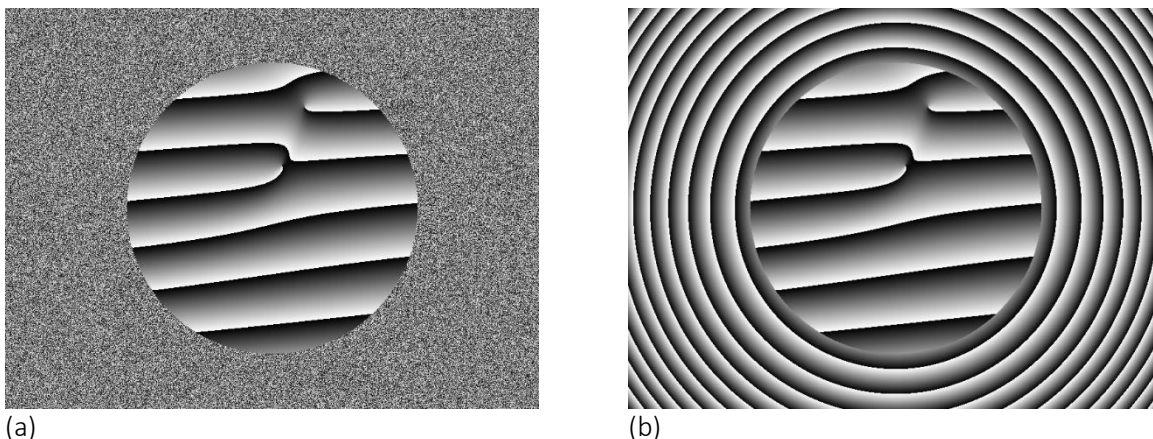


Rysunek 3. Rozkłady natężenia dla pułapki typu Laguerre-Gauss i ładunku topologicznego 5 (a) przed i (b) po korekcji modulatora SLM. (c) Fazowa struktura korygująca.

Kolejne modyfikacje procedury obliczania struktury dyfrakcyjnej związane były z wykorzystaniem diody laserowej jako źródła wiązki pułapkującej. Ze względu na emisję światła w szerokim spektrum, diody laserowe stały się atrakcyjne w zastosowaniach biologicznych. Dobór odpowiedniego spektrum emitowanego światła wiąże z ograniczeniem absorpcji promieniowania elektromagnetycznego i w konsekwencji z uniknięciem uszkodzenia biologicznych struktur tkankowych. W porównaniu z innymi źródłami światła stosowanymi w pułapkowaniu optycznym, lasery półprzewodnikowe charakteryzują się wyraźnie niższą ceną, łatwością obsługi i mniejszymi gabarytami. Do ich podstawowych wad należy niska moc oraz gorsza jakość wiązki. Ze względu na specyfikę laserów półprzewodnikowych obliczane struktury dyfrakcyjne powinny charakteryzować się wysoką wydajnością dyfrakcyjną oraz możliwościami korekcji kształtu wiązki.

W pracy **H4** przedstawiono wyniki badań dotyczących wykorzystania diod laserowych w holograficzny manipulatorze optycznym. Badania nad układem formowania wiązki w oświetlaczu laserowym wykazały, że kluczowym parametrem jest kształt emitera diody. Przebadano diody laserowe z trzech grup: wielomodowe, jednomodowe oraz jednomodowe sprzężone ze światłowodem.

Do korekcji kształtu zogniskowanej wiązki laserowej zastosowano dwa podejścia. Pierwsze polegające na generowaniu struktury dyfrakcyjnej metodą transformaty Fouriera z wykorzystaniem iteracyjnego algorytmu Gerchberga-Saxtona zwiększającego wydajność dyfrakcyjną. Drugie, to zastosowanie ograniczenia aperturowego na wygenerowanej mapie fazowej (Rysunek 4).



(a) (b)
Rysunek 4. Ograniczenie aperturowe mapy fazowej. (a) z losowym rozkładem fazy (b) z soczewką Fresnela.

Zmniejszając aperturę polepszamy symetrię wiązki (splot z obrazem dyfrakcyjnym dysku Airy'ego), ale zmniejszamy gradient natężenia co może doprowadzić do utraty zdolności pułapkowania. Zewnętrzną część struktury, poza określoną aperturą kołową wykorzystuje się do osłabienia zerowego rzędu dyfrakcji. Tworzy on w preparacie kolejną nieruchomą pułpkę optyczną. Jeśli wytworzymy strukturę losowej fazy (Rysunek 4 a), to wiązka pochodząca od zerowego rzędu dyfrakcyjnego zostanie rozproszona. Jeśli zaś na zewnętrznej części wygenerujemy strukturę soczewki Fresnela (Rysunek 4b), to pułpkę pochodzącą od zerowego rzędu dyfrakcyjnego możemy przesunąć na inną głębokość niż pułpki robocze. Otrzymane struktury dyfrakcyjne, pomimo niższej mocy lasera półprzewodnikowego, pozwoliły na wygenerowanie pułpek optycznych o wystarczającej gęstości pola elektrycznego dla zastosowań biomedycznych.

3.2.3. Pomiar trajektorii pułkowanych obiektów

Oprócz oczywistej funkcji pułpki optycznej, którą jest chwywanie i przemieszczanie mikroobektów, równie ważną funkcją jest możliwość pomiarów ich właściwości fizycznych. W szczególności są to właściwości mechaniczne. Siła przywracająca wychylony obiekt z centrum pułpki optycznej jest proporcjonalna do jego wychylenia. Zatem ekwiwalentem mechanicznym pułpki optycznej jest sprężyna Hooke'a. Znając współczynnik sprężystości pułpki optycznej k_h (*ang. trap stiffness*) oraz mierząc wychylenie pułkowanego obiektu z położenia równowagi jesteśmy w stanie określić siłę, która spowodowała to wychylenie.

Aby wyznaczyć sztywność pułpki optycznej należy napisać równanie ruchu pułkowanego obiektu. Zgodnie z teorią Langevina ruchu Browna, ruch pułkowanej cząsteczki w potencjale harmonicznym opisuje równanie Langevina¹²:

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + \beta \frac{dx(t)}{dt} + k_h x(t) = \sqrt{k_B T \beta} \frac{dB}{dt}, \quad (6)$$

gdzie:

$x(t)$ – trajektoria pułkowanej cząstki o masie m ,

$\beta \frac{dx(t)}{dt}$ – siła Stokesa działająca na sferyczną drobinę o promieniu r w cieczy o lepkości η ,

$\beta = 6\pi\eta r$,

¹² R. Kubo, M. Toda, and N. Hashitsume, *Statistical Physics*, Springer, Heidelberg, 1985, Vol. 2..

$\sqrt{k_B T \beta} \frac{dB}{dt}$ – losowa składowa siły, powstająca wskutek zderzeń pułapkowanej cząstki z cząsteczkami cieczy przyjmujemy, że ma ona postać białego szumu, to znaczy jest pochodną ruchu Browna B .

Dla odpowiednio dużej skali czasu $t \gg \tau_p$ ($\tau_p = \frac{m}{\beta}$) równanie (6) może zmienić postać. Używając w eksperymencie kulek polistyrenowych o średnicach 1÷5 μm , stosunek bezwładności cząstki do siły lepkości jest mały, zatem w równaniu (6) pomijamy człon inercyjny i zapisujemy je w następującej formie

$$dX = -\lambda X dt + \sqrt{D} dB, \quad (7)$$

gdzie:

$$\lambda = \frac{k_h}{\beta}, D = \frac{k_B T}{\beta}.$$

Jest to stochastyczne równanie różniczkowe, którego rozwiązaniem jest proces Ornsteina-Uhlenbecka:

$$X(t) = \sqrt{D} \int_{-\infty}^t dB(s) e^{-(t-s)\lambda} \quad (8)$$

Kluczem do wyznaczenia sztywności pułapki optycznej k_h jest pomiar trajektorii pułapkowanego obiektu $x(t)$. W praktyce laboratoryjnej, w układach z pojedynczą nieruchomą pułapką, do detekcji ruchu pułapkowanego obiektu używana jest fotodiody cztero-połówkowa (ang. QPD - quadrant photodiode). Na powierzchni diody QPD odwzorowany jest obraz obiektu w wiązce laserowej. Ruch cząstki w pułapce optycznej powoduje odpowiednie przysłanianie ćwiartek fotodetektora. Napięcia U_x i U_y , które są proporcjonalne do wychylenia cząstki z położenia równowagi odpowiednio w kierunkach X i Y są zwykle rejestrowane z częstotliwością 10-20 kHz.

Często stosowaną metodą wyznaczania k_h jest metoda Fourierowska. Widmową gęstość mocy PSD (ang. power spectral density) trajektorii obiektu w pułapce optycznej opisuje lorentzian:

$$PSD(f) = \frac{k_B T}{\pi^2 \beta (f_c^2 + f^2)} \quad (9)$$

gdzie f_c oznacza częstotliwość zgięcia (ang. corner frequency) i wynosi:

$$f_c = \frac{k_h}{2\pi\beta} \quad (10)$$

W układzie pęsety optycznej, w której generowane jest kilka pułapek optycznych, użycie fotodiody jest trudne. W szczególności jeśli chcemy zmierzyć wychylenie obiektu z centrum pułapki lub sztywność pułapki optycznej w różnych miejscach preparatu. Z takim przypadkiem mamy często do czynienia w praktyce, np. mierząc właściwości mechaniczne komórek.

W pracy **H2** przeanalizowano możliwości wykorzystania standardowych kamer do pomiaru sztywności pułapki optycznej w układzie holograficznego manipulatora optycznego. Za standardowe kamery możemy uznać takie, które w pełnej rozdzielczości rejestrują obrazy z prędkością nie przekraczającą 60 klatek na sekundę. Jeśli rejestrację obrazu ograniczy się do fragmentu matrycy światłoczułej, to możliwy jest pomiar parametru k_h dla niewielkich mocy lasera. Zgodnie z równaniem (10) sztywność pułapki optycznej jest proporcjonalna do częstotliwości f_c .

Śledzenie trajektorii pułapkowanego obiektu polega na analizie obrazu kolejnych klatek nagranej sekwencji wideo. Najpowszechniej stosowaną metodą jest obliczanie położenia środka masy obrazu obiektu. W pracy H2 zaproponowana została inna metoda, polegająca na wpisywaniu okręgu w obraz pułapkowanej kulki polistyrenowej. Aby zbliżyć się do możliwości detekcyjnych fotodiody QPD w układzie pęsety optycznej zastosowano szybką kamerę. Rejestracja z ograniczonego obszaru matrycy pozwala na osiągnięcie prędkości do 10 000 klatek na sekundę.

W pracy H5 przeanalizowano właściwości statystyczne sygnału trajektorii pułapkowanego obiektu rejestrowanego szybką kamerą. Analiza szeregów czasowych wykazała, że powszechnie stosowany model Ornsteina-Uhlenbecka, który jest równoważny autoregresyjnemu modelowi pierwszego rzędu AR(1), jest niewystarczający do opisu danych eksperymentalnych. W procesie AR(1) aktualna wartość jest liniową kombinacją wartości poprzedniej i zewnętrznego szumu:

$$X_n = aX_{n-1} + \xi_n, \quad (11)$$

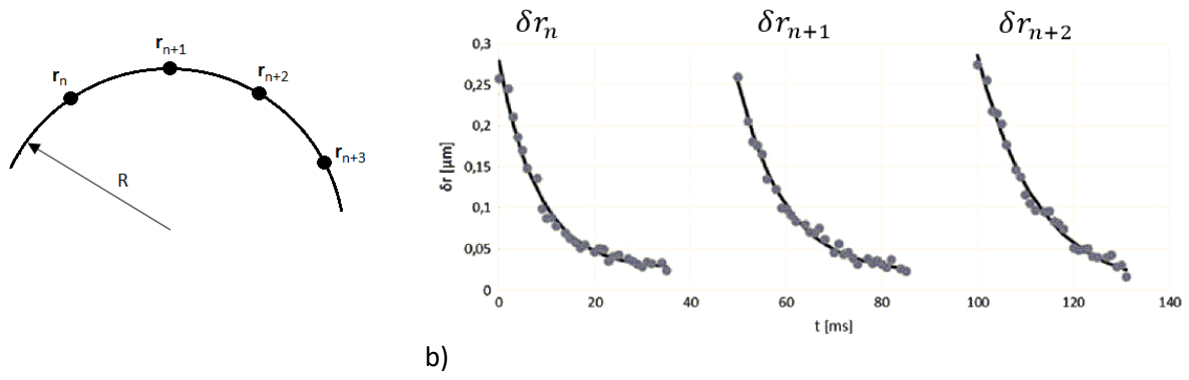
gdzie $a = e^{-\lambda\Delta t}$ jest stałą.

Rejestracja obrazów z dużą częstotliwością skutkuje pojawieniem się dodatkowego członu, w którym aktualna wartość zależy liniowo od poprzedniej próbki szumu. Zatem obserwowany proces należy uzupełnić o człon ruchomej średniej pierwszego rzędu MA(1) i ostatecznie otrzymujemy model ARMA(1,1). Wykryty efekt pamięci związany jest z działaniem matrycy światłoczułej, na której pozostają szczątkowe ładunki z poprzedniej rejestracji.

W pracy H6 wykorzystano metody szeregów czasowych do analizy rejestrowanych trajektorii ruchu. Potraktowanie pęsety optycznej jako dyskretnego filtra linowego pozwala na wyraźne odróżnienie w danych eksperymentalnych właściwości oryginalnego procesu fizycznego reprezentowanego przez część AR i zakłóceń spowodowanych eksperymentem ujawniających się w części MA. Zaproponowano użycie funkcji cząstkowej autokorelacji pacf (*ang. partial autocorrelation function*) do oceny danych eksperymentalnych. Funkcja sprawdza jednocześnie, czy dane wolne są od zakłóceń i czy zapewniają oszacowanie sztywności pułapki k_h . Opracowane narzędzia statystyczne wykorzystano do analizy rzeczywistych danych pomiarowych. Pozwoliło to na określenie wpływu parametrów kamery na dane eksperymentalne.

Dla układów z nieruchomą pułapką podstawą charakterystyką jest wyznaczenie zależności sprężystości pułapki od mocy lasera. Dla wiązki gaussowskiej jest to zależność liniowa. W przypadku pęsety optycznej z ruchomą pułapką należy wyznaczyć dodatkowo rozkład zmienności parametru k_h w obrębie preparatu mikroskopowego. Niehomogeniczność rozkładu współczynnika sprężystości wynika z aberracji układu optycznego, a także zależy od dokładności wyjustowania toru optycznego. W przypadku holograficznej generacji pułapek optycznych, zmiana współczynnika sprężystości pułapki związana jest ze spadkiem wydajności dyfrakcyjnej dla zwiększających się kątów ugięcia wiązki.

W pracy H7 przedstawiono metodę pomiaru rozkładu współczynnika sprężystości k_h w obszarze roboczym manipulatora optycznego. Metoda bazuje na wykorzystaniu szybkiej kamery do pomiaru dynamiki ruchu spułapkowanej kulki polistyrenowej poruszającej się w medium po współśrodkowych okręgach. Dla dyskretnych zmian położenia pułapki optycznej po kołowym torze $\delta r_n = r_{n+1} - r_n$ (Rysunek 5a), rejestrowane są trajektorie ruchu kulki (Rysunek 5b).



Rysunek 5. (a) dyskretny ruch kulki po okręgu, (b) trajektorie ruchu.

Na podstawie równania ruchu:

$$\beta \frac{dr}{dt} + k_h r = 0 \quad , \quad (12)$$

obliczany jest współczynnik sprężystości k_h .

$$k_h = -\frac{\beta}{t} \ln \left(\frac{r(t)}{r_0} \right) . \quad (13)$$

Ważnym elementem zaproponowanej metody pomiaru jest kalibracja pęsety optycznej. Polega ona na wyznaczeniu zależności między układem współrzędnych kamery, za pomocą której obserwowany jest preparat, a funkcją generującą hologram lub ustawiającą pochylenie zwierciadeł skanujących. Opracowana wielopunktowa metoda kalibracji z wykorzystaniem algorytmów analizy obrazów pozwala na precyzyjne pozycjonowanie pułapki i dokładny pomiar jej współrzędnych położenia. Opracowana procedura służy do kalibracji manipulatora z holograficzną generacją pułapek optycznych, a także dla układu skanowania za pomocą zwierciadeł galwanometrycznych, stosowanych do kierowania wiązką laserową dużej mocy.

Opracowane procedury analizy obrazu zostały zaimplementowane w oprogramowaniu do sterowania manipulatorem optycznym. Podobnie jak w procedurach do generacji hologramów, zostały wykorzystane biblioteki Intel IPP®. Umożliwiają one obróbkę ograniczonego obszaru obrazu z prędkością 2000 klatek na sekundę.

3.2.4. Pomiary wybranych wielkości fizycznych w skali mikro

Najpopularniejsze zastosowanie pomiarowe pęsety optycznej wynika z jej zasady działania. Pomiar siły i przemieszczenia w skali mikrometrycznej oraz sterylne warunki pomiaru spowodowały, że manipulator optyczny jest szeroko wykorzystywany w badaniach biologicznych. Jako przykład można podać pomiar właściwości mechanicznych żywych komórek, czy nici DNA. Moje pierwsze prace z wykorzystaniem pułapki optycznej dotyczyły właśnie badań właściwości sprężystych DNA.

W pracy **H1** przedstawiono metodę stabilizacji układu pęsety optycznej z pojedynczą nieruchomą pułapką. Zmianę położenia, a w konsekwencji manipulowanie chwytanym obiektem uzyskano przez ruch stolika mikroskopowego. Dodatkowo umieszczenie preparatu mikroskopowego na piezo-przesuwniku umożliwiło jego przemieszczanie z dokładnością 1 nm.

Piezo-przesuwnik został również wykorzystany do pozycjonowania obiektywu mikroskopowego. Dzięki temu pułapka optyczna mogła poruszać się wzdłuż osi propagacji wiązki laserowej. Pracując przy powiększeniu układu mikroskopowego powyżej 100x, zauważalne stały się fluktuacje mechaniczne i termiczne elementów stolika mikroskopowego. Ruch preparatu mikroskopowego identyfikowany był na podstawie analizy obrazu kulki polistyrenowej przytwierdzonej do powierzchni szkiełka nakrywkowego. Korekcję położenia w płaszczyźnie X,Y wykonano na podstawie pomiaru położenia środka masy. Algorytm *autofocus* posłużył do stabilizacji położenia w osi Z. Zastosowanie algorytmów analizy obrazu oraz piezo-przesuwników pozwoliło na trójwymiarową stabilizację położenia pułapki względem preparatu mikroskopowego. Opracowana metoda stabilizacji umożliwiła przeprowadzenie subtelnych pomiarów właściwości mechanicznych naprężonych nici DNA pod wpływem różnych czynników chemicznych.

Kolejne badania właściwości mechanicznych DNA prowadziłem już w zbudowanym przeze mnie holograficznym manipulatorze optycznym. W pracy **H10** przedstawiono wyniki pomiarów właściwości biomechanicznych nici DNA oraz komórek macierzystych ostrej białaczki szpikowej w obecności doksorubicyny stosowanej w chemioterapii.

Przeprowadzenie takich pomiarów wymagało odpowiednio dużej sztywności pułapki optycznej. Zwiększanie mocy wiązki laserowej oświetlającej modulator SLM może spowodować trwałe uszkodzenie ciekłego kryształu. Zaproponowałem aktywne chłodzenie matrycy ciekłokrystalicznej z wykorzystaniem elementu Peltiera. Wzrost intensywności światła laserowego powoduje coraz silniejsze ujawnianie się wyższych rzędów dyfrakcyjnych odpowiedzialnych za powstawanie niepożądanych pułapek (Rysunek 2). Równie silnie wzrasta moc nieruchomej pułapki pochodzącej od zerowego rzędu dyfrakcji, który jest tym silniejszy, im mniejsza jest powierzchnia czynna modulatora (*ang. fill factor*).

W celu poszerzenia funkcjonalności pęsety optycznej zbudowałem układ hybrydowy. Holograficzny manipulator optyczny został dodatkowo wyposażony w tor kierowania wiązką laserową dużej mocy za pomocą zwierciadeł galwanometrycznych. W pracy **H7** przedstawiono wykorzystanie takiego układu do pomiaru siły adhezji międzykomórkowej.

Manipulator optyczny może posłużyć do pomiaru lepkości cieczy, w której znajdują się pułapkowane obiekty. W pracy **H2** opisano metodę pomiaru lepkości bazującą na równaniu (10). Jako przykładowe przeprowadzono pomiary lepkości roztworów gliceryny o różnych stężeniach.

W pracy **H9** przedstawiono inny sposób pomiaru lepkości cieczy w układzie holograficznego manipulatora optycznego. Współczynnik lepkości wyznaczany jest na podstawie obserwacji trajektorii ruchu pułpakowanego obiektu za pomocą szybkiej rejestracji wideo. Ruch pułpakowanego obiektu wyznaczono na dwa sposoby. Pierwszy polegał na przeskokach obiektu między dwoma odpowiednio zbliżonymi pułapkami gaussowskimi. Drugi na przeskokach obiektu między gaussowską pułapką, a wiązką z wirem optycznym. Opracowane algorytmy numeryczne pozwoliły na wygenerowanie wiązki z wirem optycznym o ładunku topologicznym równym 30 z zachowaniem dużej symetrii wiązki. Ze względu na czułość układu pomiarowego na drgania mechaniczne, żaden ze znanych sposobów mechanicznego modulowania wiązki laserowej (*ang. optical chopper, optical shutter*) był nie do przyjęcia. Dlatego zaproponowałem elektroniczne modulowanie wiązki laserowej.

Zupełnie nowe możliwości pomiarowe pojawiają się podczas użycia mikro- i nano- narzędzi chwytnych przez pułapkę optyczną. Wszelkiego rodzaju mikro narzędzia mogą być wytwarzane techniką fotolitografii dwufotonowej. Wysoko rozwinięta inżynieria materiałowa pozwala na przygotowanie takich elementów, których właściwości fizyczne będą zależne od długości fali światła lasera pułapkującego. Opisany w pracy **H7** hybrydowy układ manipulatora optycznego pozwala na generację kilku niezależnych pułapek optycznych, dla różnych długości fali i różnych mocy.

W pracy **H8** przedstawiono użycie nanonarzędzi w układzie hybrydowego manipulatora optycznego. Pułapki optyczne chwytały i uaktywniały wyspecjalizowane struktury. Zastosowano termometry optyczne wykonane z nanoluminoforów bazujących na lantanowcach oraz porowaty krzem do lokalnego ogrzewania medium. Pomiar temperatury polega na porównaniu intensywności luminescencji dwóch specyficznych pasm jonów Erbu w trybie konwersji energii w górę (tj. wzbudzenie 980 nm, emisja 520-540 nm). Ich wzajemny stosunek zależny jest od temperatury, w której znajduje się nanocząstka. Pułapka optyczna na długości fali 980 nm chwytała cząstkę termometru (luminoforu) i jednocześnie aktywowała jego pracę. Porowaty krzem pobudzany był pułapką generowaną przez laser 1064 nm, dla którego wykazywał silną absorpcję. Kolejna pułapka optyczna przytrzymywała komórkę w pobliżu której umieszczane były grzałka i termometr. Dzięki temu zaobserwowany został proces hipertermii pojedynczej komórki. Jest to nowa technika umożliwiająca badania procesów biologicznych w żywych komórkach.

3.2.5. Podsumowanie

Przedstawiony cykl publikacji pt. *"Pęseta optyczna do pomiaru wybranych wielkości fizycznych w skali mikro"* pokazuje wkład własny w rozwój badań naukowych z wykorzystaniem pęsety optycznej. Jednym z celów moich prac było zaangażowanie różnych środowisk naukowych w badania z wykorzystaniem pęsety optycznej. Udostępnienie urządzenia szerszej grupie użytkowników wymagało dostosowywania układu do wykonywania specyficznych funkcji. Konieczne stało się szczegółowe scharakteryzowanie jego parametrów, opisanie możliwości i ograniczeń stosowalności zbudowanego układu.

Użyteczność holograficznej generacji pułapek optycznych wymagała opracowania odpowiednio szybkich algorytmów obliczeniowych zapewniających wysoką wydajność dyfrakcyjną i symetrię generowanych pułapek.

Pomiar przemieszczeń i sił działających na pułapkiowane obiekty wymagał dokładnego pomiaru położenia. W układach wielopułapkowych należało zrezygnować z wyspecjalizowanych fotodiod na rzecz kamer wideo. Rozważania teoretyczne wskazały minimalne wymagania parametrów rejestracji wideo. Wykazane zostało, że zastosowanie szybkiej kamery ma znaczący wpływ na rejestrowane dane eksperymentalne. Zastosowanie modelu autoregresyjnej ruchomej średniej ARMA do opisu danych eksperymentalnych pozwoliło na wyodrębnienie właściwości fizycznych i zakłóceń układu pomiarowego.

Opracowany przeze mnie układ manipulatora optycznego umożliwił wykonanie pomiarów właściwości biomechanicznych, lepkości cieczy oraz obserwację właściwości koloidów. Obiecującym kierunkiem badań wydaje się zastosowanie nanoinżynierii do wytwarzania wyspecjalizowanych czujników, takich jak termometry lub czujniki pH.

4. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

4.1. Publikacje naukowe

l.p.		IF	Punkty MNiSW
1	<p>Jankowska E., Drobczynski S., Menoni C. S., Analysis of surface deformation in thin-film coatings by carrier frequency interferometry, Appl. Opt. 56, C60-C64, 2017.</p> <p><i>Swój udział oceniam na 30% (opracowanie metod numerycznych do analizy wyników pomiarowych i analiza uzyskanych danych eksperymentalnych)</i></p>	1,650	30
2	<p>Sojka B., Podhorodecki A., Banski M., Misiewicz J., Drobczynski S., Dumych T., Lutsyk M. M., Lutsyk A. and Bilyy R., β-NaGdF₄:Eu³⁺ nanocrystal markers for melanoma tumor imaging, RSC Adv. 6, 57854–57862, 2016.</p> <p><i>Swój udział oceniam na 5% (udział w opracowaniu i budowie układu mikroskopowego do fluorescencji)</i></p>	3,108	35
3	<p>Pretka M., Wozniak W.A., Kurzynowski P., Drobczynski S., Evaluation of a linear birefringence measurement method with increased sensitivity, Appl. Opt. 55, 868-872 ,2016.</p> <p><i>Swój udział oceniam na 10% (opracowanie oprogramowania do rejestracji danych pomiarowych o wysokiej rozdzielczości)</i></p>	1,650	30
4	<p>Bacia M., Lamperska W., Masajada J., Drobczyński S., Marc M., Polygonal micro-whirlpools induced in ferrofluids, Opt. Applicata 45, 309- 316, 2015.</p> <p><i>Swój udział oceniam na 20% (opracowanie układu pomiarowego i oprogramowania)</i></p>	0,637	15
5	<p>Bacia M., Drobczyński S., Masajada J., Kopaczyńska M., Pęseta optyczna jako narzędzie współczesnej bioinżynierii, Acta Bio-Optica et Informatica Medica 19, 114-122, 2013.</p> <p><i>Swój udział oceniam na 20% (udział w redagowaniu manuskryptu)</i></p>		12
6	<p>Augustyniak I., Popiołek-Masajada A., Masajada J. and Drobczyński S., New scanning technique for the optical vortex microscope, Appl. Opt. 51, C117-C124, 2012.</p> <p><i>Swój udział oceniam na 5% (opracowanie oprogramowania do rejestracji danych pomiarowych)</i></p>	1,650	30
7	<p>Wozniak W. A., Kurzynowski P., Drobczynski S., Adjustment method of an imaging Stokes polarimeter based on liquid crystal variable retarders, Appl. Opt. 50, 203-212, 2011.</p> <p><i>Swój udział oceniam na 30% (opracowanie oprogramowania do rejestracji i analizy danych pomiarowych oraz udział w przeprowadzeniu pomiarów)</i></p>	1,650	30

8	<p>Masajada J., Leniec M., Drobczynski S., Thienpont H., Kress B., Micro-step localization using double charge optical vortex interferometer, Opt. Express 17, 16144-16159, 2009.</p> <p><i>Swój udział oceniam na 5% (opracowanie oprogramowania do sterowania modulatorem SLM)</i></p>	3,307	45
9	<p>Kurzynowski P., Drobczynski S., Wozniak W.A., Dynamic polarization states and birefringence distributions measurements in spatial elliptical polariscope using Fourier analysis method, Opt. Express 17, 10144-10154, 2009.</p> <p><i>Swój udział oceniam na 30% (opracowanie oprogramowania do rejestracji i analizy danych pomiarowych oraz udział w przeprowadzeniu pomiarów)</i></p>	3,307	45
10	<p>Drobczynski S., Kurzynowski P., Imaging polarimeter for linear birefringence measurements using a liquid crystal modulator, Opt. Eng. 47, 023603-1 – 023603-4, 2008.</p> <p><i>Swój udział oceniam na 50% (sformułowanie problemu badawczego, opracowanie oprogramowania do rejestracji i analizy danych pomiarowych oraz udział w przeprowadzeniu pomiarów)</i></p>	1,082	20
11	<p>Bueno J., Drobczynski S., Automized imaging polarimetry with carrier frequency: influence of the initial phase and diattenuation, Opt. Pura Apl. 40, 57-64, 2007.</p> <p><i>Swój udział oceniam na 30% (opracowanie metod numerycznych i analiza danych pomiarowych)</i></p>		
12	<p>Kurzynowski P., Wozniak W. A., Drobczynski S., A new phase difference compensation method for elliptically birefringent media, Opt. Comm. 267, 44-49, 2006.</p> <p><i>Swój udział oceniam na 20% (obliczenia i symulacje numeryczne właściwości układu pomiarowego)</i></p>	1,588	25
13	<p>Drobczynski S., Bueno J., Artal P., Kasprzak H., Transmission imaging polarimetry for a linear birefringent medium using a carrier fringe method, Appl. Opt., 45, 5489-5496, 2006.</p> <p><i>Swój udział oceniam na 40% (sformułowanie problemu badawczego, opracowanie metod numerycznych i analiza danych pomiarowych, udział w przeprowadzeniu pomiarów)</i></p>	1,650	30
14	<p>Drobczynski S., Kasprzak H., Application of space periodic variation of light polarization in imaging polarimetry, Appl. Opt. 44, 3160-3166, 2005.</p> <p><i>Swój udział oceniam na 70% (sformułowanie problemu badawczego, opracowanie metod numerycznych i analiza danych pomiarowych, udział w redakcji manuskryptu)</i></p>	1,650	30

4.2. Prezentacje na konferencjach naukowych

l.p.	Konferencja
1	Krajowa Konferencja Elektroniki, Darłówko Wschodnie 3-7.06.2018 plakat „Zastosowanie pułapki optycznej do generatora liczb losowych”
2	Zjazd Fizyków Polskich, Wrocław 10-15.09.2017 referat „Wielofunkcyjny manipulator optyczny”
3	Polska Konferencja Optyczna, Gniezno 2 – 6.07.2017 referat „Kontrolowane ogrzewanie mikro-objektów w układzie manipulatora optycznego”
4	SPIE Optics + Photonics 2016/ Optical Trapping and Optical Micromanipulation XIII, San Diego 28.08-1.09.2016 plakat “Double wavelength optical tweezers for remote temperature sensing”
5	43 Zjazd Fizyków Polskich, Kielce 6-11.09.2015 referat „Holograficzne szczypce optyczne”
6	Polska Konferencja Optyczna, Legnica 28.06 – 2.07.2015 referat „Holograficzna peseta optyczna do badań spektroskopowych”
7	Stochastic Modeling of Anomalous Dynamics in Complex Physical and Biological Systems Hugo Steinhaus Center, Wrocław 14-16.05.2015 plakat „Time series methods in analysis of the optical tweezers”
8	XIX Polish-Slovak-Czech Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, Wojanów 8-12.09. 2014, referat „Remote temperature sensing of optical trap by using up-converting particles” Komitet organizacyjny
9	III Polska Konferencja Optyczna, Sandomierz, 30.06-4.07, 2013 referat „Zastosowanie holografii dynamicznej w manipulatorach optycznych”
10	BioMedTech Silesia, Rzeszów 15 -16.03.2013 plakat „Szczypce optyczne”
11	5 th International Symposium, Optical Tweezers in life science, Berlin, Germany, 18.06.2013 plakat “Changing the state of nano-particles in ferrofluid with optical tweezers”
12	18th Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, Ostravice, Czech Republic, 3-7.08.2012 plakat “Particle position measuring with optical tweezers using video processing”
13	7 th International Conference on Photonics, Devices and Systems, Prague, Czech Republic, 24-26.08.2011 plakat “Light polarization state analyzer based on two spatial carrier frequency method”
14	17th Slovak-Czech-Polish Optical Conference Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, Liptovsky Jan, Słowacja, 6 – 10.09.2010 plakat “Performance analysis of imaging Stokes polarimeter based on liquid crystal modulators”
15	3rd EUROPEAN MEETING IN PHYSIOLOGICAL OPTICS, London, UK, 7-9.09.2006 plakat “Polarimetry with carrier frequency and its application in measurement of anisotropy of the eye elements”
16	The 5-th International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, Stuttgart, Germany, 12- 14.09.2005 plakat “Some remarks on accuracy of imaging polarimetry with carrier frequency”
17	106-th Conference of the DGaO, Wrocław, 17-20.05. 2005 plakat “Imaging polarimetry with carrier frequency for the linearly birefringent media”
18	International Conference on Systems of Optical Security, Warszawa, 11-12.12.2003 plakat “Modeling of influence of liquid crystal modulator adjustment on reconstruction of birefringence and azimuth angle in imaging polarimetry with carrier frequency”

BioMedTech

Silesia

3 MIEJSCE - NAGRODA PUBLICZNOŚCI

Sławomir Drobczyński

Instytut Fizyki, Wydział Podstawowych Problemów Techniki,
Politechnika Wroclawska

ZA PREZENTACJĘ

„Szczypce optyczne”

PRZEDSTAWIONĄ PODCZAS KONFERENCJI BIOMEDTECH SILESIA 2013 DOKTOR

ZABRZE, 08.03.2013

MIEJSCE / DATA

DR ZBIGNIEW AWARAT

PREZYDENT KONFERENCJI



FUNDACJA ROZWOJU KARDIOCHIRURGII



ŚLĄSKIE CENTRUM CHOROBY SERCA,
KARDIOLOGIA I ŚCIŚNIĘCIE



UNIWERSYTET WROCŁAWSKI



INTERNETOWA PROMOCJA NAUKI - IMPONA

Publikacje konferencyjne:

Lp.	
1	Jankowska E., Drobczyński S. , Menoni C. S., Carrier frequency interferometry for wavefront measurements of coated optics, IEEE 17291842, 1-2, 2017.
2	Bacia M., Masajada J., Drobczyński S. , Lamperska W., Kutrowska J., Walczak K., Light induced particle organization in paramagnetic fluids, Proc. SPIE 9441, 1-12, 2014.
3	Slezak J., Drobczyński S. , Weron K., Masajada J., Moving average process underlying the holographic-optical-tweezers experiments, Proc. SPIE 9066, 2013.
4	Matejek D., Langner M., Drobczyński S. , Szczypce optyczne, ISBN 978-83-63151-03-4, 271-280, 2013.
5	Drobczyński S. , Bacia M., Wozniak M., Symonowicz K., Particle position measuring with optical tweezers using video processing, Proc. SPIE 8697, 86970X-1 – 86970X-6, 2012.
6	Drobczyński S. , Wozniak W.A., Kurzynowski P., Light polarization state analyzer based on two spatial carrier frequency method, Proc. SPIE 8306, 83060R-1 – 83060R-6, 2011.
7	Drobczyński S. , Kurzynowski P., Wozniak W.A., Performance analysis of imaging Stokes polarimeter based on liquid crystal modulators, Proc. SPIE 7746, 77461F-1 – 77461F-8, 2010.
8	Wozniak W.A., Drobczyński S. , Kurzynowski P., Spatial elliptical polariscope for polarization distribution measurements, Proc. SPIE 7390, 739009-1 – 739009-10, 2009.
9	Drobczyński S. , Kasprzak H., Some remarks on accuracy of imaging polarimetry with carrier frequency, in Proceedings of the 5-th International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, 204-207, 2005.
10	Drobczyński S. , Kasprzak H., Modeling of influence of Liquid Crystal Modulator adjustment on reconstruction of birefringence and azimuth angle in imaging polarimetry with carrier frequency, Proc. SPIE, 5566, 273-277, 2003.

4.3. Współpraca naukowa

- EIT+ Wrocławskie Centrum Badań;
- Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych, PAN, Wrocław;
- Katedra Patomorfologii, Uniwersytet Medyczny, Wrocław;
- Katedra i Klinika Hematologii, Nowotworów Krwi i Transplantacji Szpiku, Wrocław;
- Katedra Inżynierii Biomedycznej, Politechnika Wrocławska;
- Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych, Instytut Technologii Mechanicznej, Politechnika Poznańska;
- Instytut Genetyki Człowieka, PAN, Zakład Biologii Rozrodu i Komórek Macierzystych, Poznań;
- Department of Applied Physics, University of Eastern Finland;
- Department of Electrical & Computer Engineering, Colorado State University, USA.

4.4. Staże naukowe

- Department of Electrical & Computer Engineering, Colorado State University, USA, 2016 (1 miesiąc);
- Universite Louis Pasteur Strasbourg, Francja, 2007-2008 (20 miesięcy);
- CNRS Strasbourg, Francja, 2006 (2 miesiące);
- Laboratorio De Optica, Universidad De Murcia, Hiszpania, 2005 (3 miesiące).

4.5. Patenty

- **S. Drobczyński**, „Sposób i układ do holograficznego obrazowania metodą mikroskopii fluorescencyjnej z wygaszaniem przez emisję wymuszoną”, PL 228233 B1;
- **S. Drobczyński**, „Układ i sposób do holograficznego obrazowania metodą mikroskopii fluorescencyjnej z wygaszaniem przez emisję wymuszoną”, PL 228298 B1;
- P. Kurzynowski, W.A. Woźniak, **S. Drobczyński**, „Sposób wyznaczania optycznych własności niedichroicznych ośrodków dwójtomnych i układ polaryskopu eliptycznego”, PL 220901 B1;
- H. Kasprzak, **S. Drobczyński**, „Sposób wyznaczania map rozkładu przesunięcia fazowego ośrodków eliptycznie dwójtomnych, niedichroicznych oraz układ do wyznaczania map rozkładu przesunięcia fazowego ośrodków eliptycznie dwójtomnych, niedichroicznych”, PL 210025 B1.

Zgłoszenia patentowe:

- „Sposób diagnozowania nowotworów układu chłonnego”, P423266;
- „Kompaktowa komora pomiarowa kompatybilna z układem szczypiec optycznych w warunkach kontrolowanego stężenia tlenu” P424002.

4.6. Udział w projektach badawczych

I.p.	Projekt	udział
1	Opracowanie multifunkcyjnych szczypiec optycznych i mikrorobotów do badania wpływu zlokalizowanej hipertermii na komórki i sferoidy nowotworowe uzyskane z hodowli pierwotnych, 2017/27/B/ST7/01255, NCN, OPUS ,36 – miesięcy, 1 445 160 zł.	kierownik
2	Zastosowanie niskomocowych laserów półprzewodnikowych do generacji holograficznych pułapek optycznych, N N518 498839, MNiSW, 36-miesiące, 343 325 zł.	kierownik
3	Pęseta optyczna w zastosowaniach biomedycznych, N R13 0023 10, NCBiR, 36-miesiące, 1 486 300 zł.	główny wykonawca
4	Polarymetria obrazowa z częstością nośną dla ośrodków liniowo dwójtomych, 3 T11E 006 30, MNiSW,10-miesiące, 33 750 zł.	główny wykonawca
5	Wykorzystanie innowacyjnej technologii szczypiec optycznych w celu opracowania mało inwazyjnej terapii celowanej chłoniaków, LIDER/016/275/L-5/13/NCBR/2014, 36-miesiące, 1 199 996 zł.	wykonawca
6	Mikroskop skaningowy na wirach optycznych, NCN, OPUS, 36-miesiące, 448 624 zł.	wykonawca
7	Analiza jakości filmu łzowego po mrugnięciu. Nowe okno na zrozumienie etiologii chorób oczu związanych z filmem łzowym, 2011/03/D/ST7/02512, NCN, SONATA, 36-miesiące, 399 672 zł.	wykonawca
8	Kompaktowy polarymetr do pomiarów w czasie rzeczywistym optycznych własności dwójtomych ośrodków anizotropowych, N N505 378337, MNiSW,30-miesiące, 219 400 zł.	wykonawca
9	Wykorzystanie wirów optycznych do badania topografii powierzchni w skali mikro i nano, N N505 463438, ,30-miesiące, 266 100 zł.	wykonawca
10	Zadanie 7.1. NAOMIS - Opracowanie nowoczesnych metod biodetekcji i bioobrazowania komórek z wykorzystaniem nanowymiarowych znaczników luminescencyjnych, NCBiR, EIT+ Wrocław Research Centre, 53-miesiące, 500 000 euro	wykonawca

Inne projekty realizowane z wykorzystaniem zbudowanego przeze mnie manipulatora optycznego:

- „Opracowanie nowych metod pomiarowych dla holograficznej pęsety optycznej”, MNiSW, diamentowy grant, 42-miesiące, 191 600 zł;
- „Mikromechanika błony i jej udział w procesie samo-segregacji składników błony biologicznej”, PRELUDIUM (2016/21/N/NZ1/02767), NCN, 24-miesiące, 96 800 zł;
- „Molekularny mechanizm działania i ocena efektu terapeutycznego kombinacji 5-aza-2'deoksycytydyny i inhibitorów topoizomeraz w leczeniu raka okrężnicy”, NCN, OPUS, 36-miesiące, 1 072 520 zł.

4.7. Stypendia i nagrody

- 2018, projekt LIDER „Wykorzystanie innowacyjnej technologii szczypiec optycznych w celu opracowania mało inwazyjnej terapii celowanej chłoniaków”, w którym byłem współwykonawcą uzyskał Polską Nagrodę Inteligentnego Rozwoju, pod patronatem Prezes Urzędu Patentowego RP;
- 2016, nagrodę Rektora Politechniki Wrocławskiej za wyróżniający wkład w działalność uczelni;
- 2011, stypendium Młoda Kadra;
- 2009, stypendium START Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej;
- 2006, nagroda Rektora Politechniki Wrocławskiej za pracę doktorską;
- 2006, dyplom uznania dyrektora Instytutu Fizyki Politechniki Wrocławskiej za pracę doktorską.

5. Działalność dydaktyczna

Moja dotychczasowa praca dydaktyczna koncentruje się na specjalistycznych zajęciach laboratoryjnych, takich jak:

- Interferometria i holografia
- Holografia klasyczna i syntetyczna
- Optyka falowa
- Pomiary optyczne

Od 2012 roku prowadzę także autorski wykład i laboratorium „Optoelektroniczna aparatura pomiarowa”. Kurs prowadzony jest dla studentów I stopnia na kierunku – Inżynieria kwantowa oraz studentów II stopnia na specjalności – Inżynieria optyczna. Celem kursu jest przygotowanie studentów do pracy we współczesnych laboratoriach fizycznych oraz zapoznanie z aktualnie dostępnymi i wykorzystywanymi technologiami optoelektronicznymi. Podczas zajęć studenci poznają praktyczne aspekty i zasady działania najbardziej popularnych technik pomiarowych. W ramach kursu prezentowane są sposoby pozyskiwania danych z czujników pomiarowych, przesyłania ich do komputera, analizy danych pomiarowych oraz sterowania pracą zewnętrznych urządzeń z poziomu komputera.

Sprawuję merytoryczny nadzór nad Laboratorium Interferometrii i Holografii. W przygotowanych ćwiczeniach prezentuję klasyczne doświadczenia interferencyjne w połączeniu ze współczesnymi sposobami pozyskiwania danych i ich analizy np. komputerowej analizy obrazów w środowisku obliczeniowym Matlab.

Uczestnictwo w realizacji różnych projektów badawczych zachęca mnie do śledzenia bieżących rozwiązań technologicznych i aktualnego stanu wiedzy. Podczas zajęć sygnalizuję wszelkie nowości. W pracy ze studentami kładę szczególny nacisk na zrozumienie omawianych zjawisk fizycznych i wyciąganie odpowiednich wniosków, w szczególności w kontekście zastosowań pomiarowych.

Prace dyplomowe :

Lp.	Imię i nazwisko	Tytuł	rok	rodzaj
1	Marcin Bacia	Zastosowanie algorytmów iteracyjnych do komputerowej generacji hologramów	2011	mgr
2	Agata Chochowska	Pomiary wybranych charakterystyk pułapki optycznej	2012	inż.
3	Piotr Grela	Pomiar ogniskowych soczewek z wykorzystaniem algorytmu autofocus	2013	inż.
4	Tomasz Poźniak	Realizacja soczewek Fresnela generowanych na transmisyjnym modulatorze ciekłokrystalicznym	2013	inż.
5	Grzegorz Łupkowski	Pomiar przemieszczeń metodą fotografii plamkowej z wykorzystaniem cyfrowej kamery wideo	2013	mg.
6	Adrian Adamski	Opracowanie oprogramowania do analizy obrazów dyfrakcyjnych dalekiego pola	2015	inż.
7	Joanna Hołyшко	Zastosowanie luminoforów koloidalnych do pomiaru temperatury w układzie manipulatora optycznego	2015	mgr
8	Patryk Frankowski	Opracowanie oświetlacza mikroskopowego z wykorzystaniem diody LED dużej mocy	2017	inż.
9	Aleksandra Korzeniewska	Opracowanie układu do rekonstrukcji frontu falowego z wykorzystaniem elementu Shack-Hartmann	2017	inż.
10	Eliasz Korzeniewski	Komputerowa analiza i wizualizacja pomiaru przemieszczeń metodą interferencji plamkowej	2017	inż.
11	Mateusz Świerad	Pomiary trajektorii obiektów w niesymetrycznych pułapkach optycznych	2017	inż.
12	Iwona Biernacka	Przystosowanie studenckiego układu rejestracji hologramów do współpracy z aparatem cyfrowym	2018	inż.
13	Edyta Bobrowska	Zastosowanie modulatora SLM do generacji niesymetrycznych pułapek optycznych	2018	inż.
14	Aleksandra Korzeniewska	Zastosowanie elementu Shacka-Hartmanna w układzie dynamicznej korekcji frontu falowego	2018	mgr
15	Eliasz Korzeniewski	Wykorzystanie nanoluminoforów konwertujących energię w górę w obrazowaniu mikroskopowym	2018	mgr

Promotor pomocniczy pracy doktorskiej Marcina Baci na temat „Zastosowania holograficznej pęsety optycznej do pomiarów wybranych właściwości preparatów biologicznych i koloidów”. Mgr inż. Marcin Bacia w 2011 roku obronił pracę magisterską pt. „Zastosowanie algorytmów iteracyjnych do komputerowej generacji hologramów”, której byłem promotorem. W ramach interdyscyplinarnych studiów doktoranckich, mgr inż. Marcin Bacia wykorzystywał zdobyte doświadczenia w technice komputerowej generacji hologramów do przystosowania układu holograficznej pęsety optycznej do specyficznych badań biologicznych. Doktorant wykazał się umiejętnością połączenia potrzeb specjalistów z dziedziny biologii i medycyny z możliwościami technicznymi układu pęsety optycznej. Należy podkreślić fakt, że zdobyte umiejętności i opracowane procedury przygotowania preparatów biologicznych pozwoliły na przeprowadzenie wielu ciekawych i trudnych eksperymentów, np. badania właściwości

sprężystych nici DNA. Jeżeli chodzi o preparatykę związaną z badaniami koloidów doktorant wykazał się dużą pomysłowością i dobrym warszatem inżynierskim. Wyniki eksperymentów oddziaływania pułapek optycznych na ferrofluidy zostały opublikowane w renomowanym czasopiśmie Optics Letters.

Nadzór nad projektami studenckimi w ramach kół naukowych:

- opracowanie i budowa liniowej kamery do pomiarów widma dyfrakcyjnego;
- opracowanie i budowa sterowników diody laserowej;
- opracowanie i budowa wzmacniacza wysokonapięciowego.

6. Popularyzacja nauki

- prowadzenie spotkań z młodzieżą w ramach „Drzwi otwarte na Politechnice Wrocławskiej”;
- prowadzenie zajęć laboratoryjnych z fizyki dla uczniów Niepublicznego Gimnazjum Sióstr Salezjanek we Wrocławiu.

7. Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych

Kilkukrotnie recenzowałem artykuły naukowe dla następujących czasopism:

- Optics Express
- Optics Letters
- BioMed Research International
- Optica Applicata